

J-PARC 3 MeV リニアック用制御システム開発

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM AT A 3 MEV LINAC IN J-PARC

澤邊祐希^{#,A)}, 石山達也^{B)}, 高橋大輔^{B)}, 加藤裕子^{B)}, 鈴木隆洋^{A)}, 平野耕一郎^{B)}, 武井早憲^{B)}, 明午伸一郎^{B)},
菊澤信宏^{B)}, 林直樹^{B)}

Yuki Sawabe^{#,A)}, Tatsuya Ishiyama^{B)}, Daisuke Takahashi^{B)}, Yuko Kato^{B)}, Takahiro Suzuki^{A)}, Koichiro Hirano^{B)},
Hayanori Takei^{B)}, Shin-ichiro Meigo^{B)}, Nobuhiro Kikuzawa^{B)}, Naoki Hayashi^{B)}

A) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

B) J-PARC/JAEA

Abstract

In the J-PARC, a 3 MeV linac has been developed for the tests of beam scraper irradiation and charge exchange by high-power laser. To accomplish tests efficiently and safely, the control system for 3 MeV was designed and developed, and this system consists of four subsystems, personal protection system, machine protection system, timing system, and remote control system using the EPICS. In this paper, the details of control system for a 3 MeV linac are presented.

1. はじめに

J-PARC では、ビームスクレーパへの照射試験[1]、及び高出力レーザーを用いた荷電変換試験[2]等を行う為、3 MeV リニアックを設置した。3 MeV リニアックは、セシウム添加高周波駆動負水素イオン源 (RF イオン源)、高周波四重極型リニアック (RFQ I 号機)、電磁石、真空機器、モニタ群で構成されている。3 MeV リニアックの全体図を Figure 1 に、機器配置図を Figure 2 に示す。

3 MeV リニアックの運転において、機器を監視、動作させるシステム、及び人員・機器を保護するインターロックシステム、の構築が重要となる。特に 3 MeV リニアックでは、加速器運転の他に、高出力レーザーを用いた試験、及びビームの安定化を目的としたイオン源単独運転が要求され、インターロックシステムの安全に対する信頼性が非常に重要となる。これらの重要なシステムを効率的に実現する為、2014 年に稼働させていた RF イオン源 & RFQ III 号機テストスタンドの制御システム[3]をベースにして、3 MeV リニアックの制御系の設計、開発を行った。機器を監視、動作させる機構として、EPICS を用いた遠隔制御システム、各機器間を同期動作させるタイミングシステム[4]を構築した。

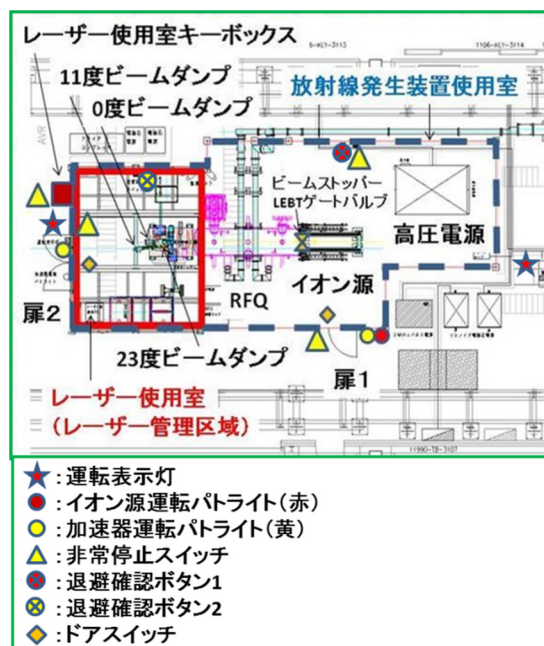


Figure 1: Overall view in a 3 MeV linac.

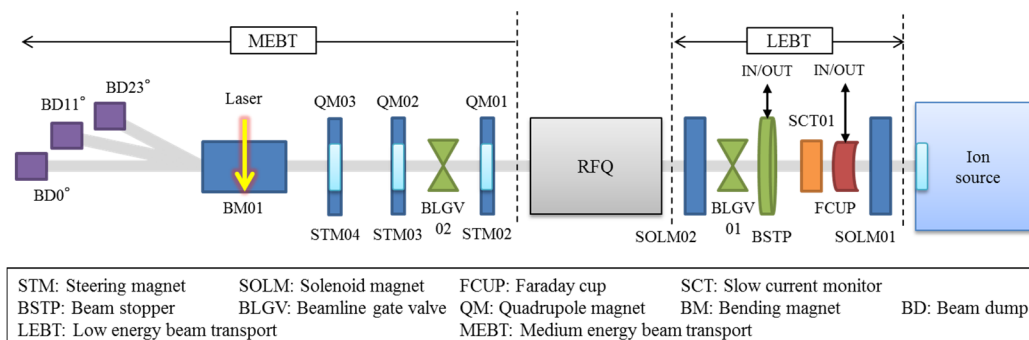


Figure 2: Device layout in a 3 MeV linac.

[#] z-sawabe@post.j-parc.jp

一方、インターロックシステムとしては、各機器の異常を検知し即座にビームを停止させる機器保護システム (MPS) [5]を構築した。また、MEBT (Medium Energy Beam Transport)において、高出力レーザを使用する為、Figure 1 に示すレーザ管理区域を制定し、放射線、及びレーザから人体への被害を防止する人的安全保護システム (PPS)を構築した。本発表では 3 MeV リニアック用制御システムについて報告する。

2. 遠隔制御システム

各機器を遠隔で操作、監視、データ収集を行う為に、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) を使用した遠隔制御システムを構築した。EPICS を使用した遠隔制御システムの制御信号伝達手法について Figure 3 に示す。EPICS では EPICS レコードと呼ばれる制御情報を用いて遠隔制御を実現する。各機器の制御信号はデバイスサポートコントローラに接続され、EPICS IOC (Input Output Controller) を介して、EPICS レコードと紐づけられる。上位計算機は EPICS レコードを介して、機器の遠隔監視制御を行う。

3 MeV リニアックの遠隔制御対象機器と接続する EPICS IOC、デバイスサポートコントローラについて Table 1 に示す。3 MeV リニアックでは、4 枚の VME CPU ボードと 2 台の計算機上 (soft IOC) で EPICS IOC を走らせている。VME の EPICS IOC 下には、デバイスサポートコントローラとして PLC 6 台、EMBLAN 3 台、同じ VME バス内に存在する種々な VME 制御ボード計 21 枚を使用している。EMBLAN とは、独自開発したイーサネット用コントローラボードである。Soft IOC はモニタ機器が接続されているオシロスコープとイオン源用分光器の波形データを取得し、EPICS レコードと紐づけている。また、3 MeV リニアックでは、RFQ のトリップ頻度を低減する為、RFQ の 24 時間無人コンディショニング運転を予定している。無人運転の際、J-PARC 加速器を一括監視している中央制御棟 (CCR) での監視要望がある為、3 MeV リニアックのネットワークは、J-PARC 加速器の制御ネットワークに接続している。

Table 1: EPICS IOC List for a 3 MeV Linac

Device	IOC	Controller
Ion source SOLM01,02 STM01 PS	VME	PLC
2 MHz Amplifier (IS)		PLC
30 MHz Amplifier (IS)		PLC
RFQ, LLRF		PLC
Klystron, High voltage Power supply		PLC
MEBT Vacuum, Scraper, Cooling water		PLC
QM03 PS		EMBLAN
STM04(Horizontal) PS		EMBLAN
STM04(vertical) PS		EMBLAN
QM01, 02 PS, BM01 PS, STM02,03 PS, MPS Unit, MPS Logic Controller, Wire scanner monitor		VME Board (DI x2, DO x2, DIO x1, ADC x1,DAC x1, 4-axis pulse x1)
FCUP, BLGV	VME	VME Board (DI x1, DO x1, ADC x1, 4-axis pulse x1)
Timing (Master)	VME	VME Board (send module x1)
Timing (Client)	VME	VME Board (Receive module x8)
Spectrometer (IS)	Soft IOC	(Spectrometer)
Monitor	Soft IOC	(Oscilloscope)

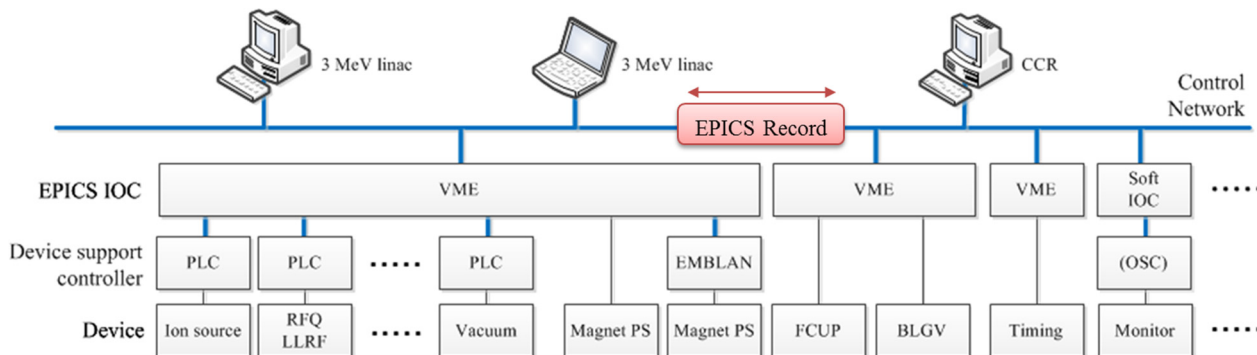


Figure 3: Communication method of the control signal by EPICS.

3. タイミングシステム

3 MeV リニアックのタイミングシステムは、J-PARC で利用されているスケジュールドタイミングで構築した[4]。スケジュールドタイミングは、あらかじめ決められた 25 Hz 基準クロックからのディレイ値通りにタイミング信号を出力させる。各タイミング信号のディレイ値は、256 パターンのディレイ値を格納できるルックアップテーブル (LUT) に定義され、各パターンには Type と呼ばれる制御ワードが割り当てられている。LUT と Type を組み合わせることにより 3 MeV リニアックで要求される全てのタイミング信号を供給することが可能となっている。Figure 4 にタイミングシステムの構成図を示す。

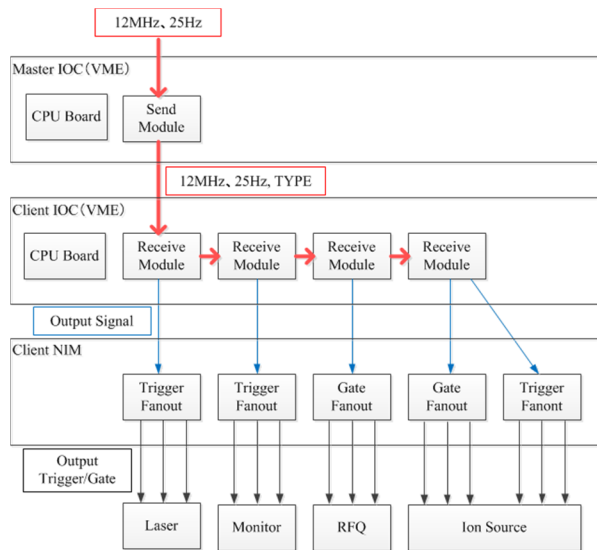


Figure 4: Layout of timing system.

Master IOC の送信モジュールは、Client IOC の受信モジュールにマスタークロック (12 MHz)、25 Hz 基準クロック、Type をシリアル通信で送っている。受信モジュールは、送られてきた Type と LUT に書かれたディレイ値を基に Trigger/Gate Fanout へディレイドパルス信号を送る。これにより、Trigger/Gate Fanout から任意のタイミング信号 (5 V/50 Ω) が出力される。Trigger Fanout 1 台に

つき 8ch のトリガ信号、Gate Fanout 1 台につき 4ch のゲート信号が出力可能である。3 MeV リニアックでは、イオン源、RFQ、モニタ、レーザ用に Table 2 に示すタイミング信号の供給している。

Table 2: Timing-Signal for a 3 MeV Linac

Device	Use signal	Use Fanout
Ion Source	Trig.: 2ch	Trig. Fanout: 1 modules
	Gate: 13ch	Gate Fanout: 4 modules
RFQ	Trig.: 8ch	Trig. Fanout: 1 modules
	Gate: 4ch	Gate Fanout: 1 modules
Monitor	Trig.: 9ch	Gate Fanout: 1 modules
	Gate: 3ch	Trig. Fanout: 2 modules
Laser	Trig.: 1ch	

イオン源用にトリガ信号 2ch、ゲート信号 13ch、RFQ 用にトリガ信号 8ch、ゲート信号 4ch、モニタ用にトリガ信号 9ch、ゲート信号 3ch、レーザ用にトリガ信号 1ch のタイミング信号を作成した。3 MeV リニアックのタイミングシステムは、Gate Fanout 6 枚、Trigger Fanout 4 枚で構成されている。

4. 3 MeV リニアックのインターロックシステム

3 MeV リニアックを安全に運転する為には、MPS 及び PPS が重要となる。PPS には、自主的なインターロックシステムを加え、安全性の強化を図った。Figure 5 に 3 MeV リニアックのインターロックシステムを示す。

MPS、PPS の両システムで、ビームストップ (BSTP)、及び LEBT に設置してあるビームラインゲートバルブ (BLGV) を制御し、異常時にビーム加速を停止させる。これらの制御は MPS/PPS Interface Unit を介して行っている。次節より MPS、及び PPS について、詳しく説明する。

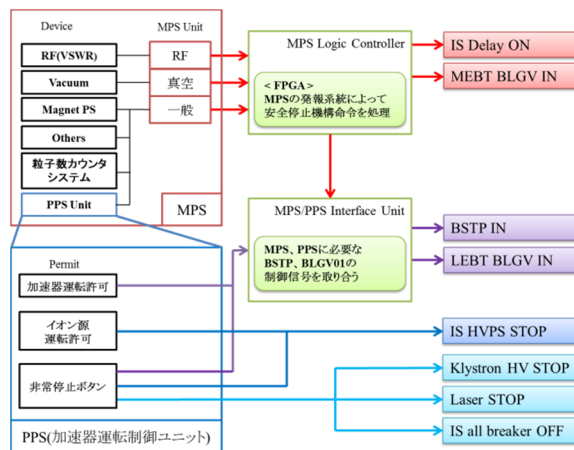


Figure 5: Interlock system for a 3 MeV linac.

4.1 MPS

MPS では、機器から出力された異常信号をハードワイヤ経由で MPS モジュールが受信し、異常信号を検知した MPS モジュールは、直ちに上位の MPS Logic Controller[6]にハードワイヤ経由で信号を送り、ビーム加速を停止させる。MPS モジュールは一般系、RF 系、真空系の三種類の系統に分類している。一般系にはイオン源電源、各種電磁石電源、BLGV、冷却水流量計、PPS ユニット(後述する加速器運転制御ユニット)、及び粒子数カウンターシステムの異常信号が接続されている。粒子数カウンターシステムとは、ビームダンプの破損を防ぐ為、3 MeV リニアックで制限されている 1 時間あたりの加速粒子数 (4.0×10^{18} [particle/h]) を超えたビーム加速を防止するシステムである[3]。RF 系には RF 反射波異常信号が接続されている。真空系には、LEBT、RFQ、MEBT に設置してある B/A ゲージの真空値異常信号が接続されている。

三種類の系統では、それぞれビーム加速を停止させる動作が異なる。ビーム加速停止命令の処理は MPS Logic Controller が行っている。MPS の各系統に対応するビーム加速停止動作について Table 3 に示す。

Table 3: Beam Inhibit Logic by MPS

Series	Logic
一般系	IS Delay ON, BSTP IN
RF	IS Delay ON
真空系	IS Delay ON, BSTP IN LEBT BLGV, MEBT BLGV IN

一般系は、MPS 発報時の基本となるビーム加速停止動作である。Table 3 に示す IS Delay ON 信号によって、イオン源のプラズマ生成タイミングを RFQ の加速タイミングからずらし、ビームが加速されないようにしている。また、BSTP IN 信号によって、ビームストップを挿入し、物理的にビームの入射を防ぎ、ビーム加速を停止させている。一般系に対し、RF 系では IS Delay ON 信号のみでビーム加速を停止する。これは、RF によるトリップが頻繁に起こりえる為、ビームストップの寿命とビーム停止時間の短縮を考慮した為である。また、真空系では、基本的なビーム加速停止動作に加え、LEBT BLGV、及び MEBT BLGV IN 信号によって、RFQ 前後に設置されているビームラインゲートバルブを挿入する。この結果、真空悪化の影響が他区画に拡大することを防ぐとともに、ビーム加速を防いでいる。

4.2 PPS

放射線発生装置の周りにフェンスまたは黒色アルミ板(遮光壁)を設置し、放射線発生装置使用室内への入域を制限している。レーザー管理区域に設定されているレーザー使用室は、レーザー光の漏えいを防ぐ為、黒色アルミ板(遮光壁)で覆われている。このため、放射線発生装置室の出入口は、イオン源および RFQ にアクセスする扉(扉 1)とレーザー使用室内に入域する扉(扉 2)の 2 箇所存在するが、扉 1 と扉 2 の間の往来はできない。

3 MeV リニアックでは、加速器運転のほかに、イオン源の単独運転、レーザーの調整運転を同時に行う必要がある。その為、PPS では、レーザー運転、イオン源運転および加速器運転時に放射線発生装置使用室内に人が誤って入域することを防止しなければならない。Figure 6 に PPS のロジックを示す。

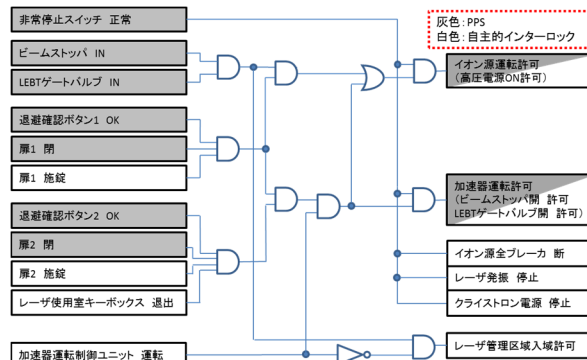


Figure 6: PPS logic chart.

3 MeV リニアックでは、PPS に自主的なインターロックシステムを加え、安全性の強化を図っている。ビーム運転する為には、加速器運転許可を確立する必要がある。加速器運転許可を確立する為には、最初に放射線発生装置使用室内に人がいないことを確認する必要がある(退避確認)。扉 1 のエリア内と、扉 2 のエリア内に人がいないことを確認し、各々のエリア内に設置してある退避確認ボタンを押す。退避確認ボタンが押されてから1分以内に対応する扉を閉めないと退避確認が解除される。扉 1 は退避確認ボタンが押して扉1を閉めた後、イオン源高圧電源用の接地棒を扉前に横渡しにすることで退避確認1が確立し、イオン源運転許可が確立する。扉 2 を鍵で施錠し、レーザー使用室外側のキーボックスに鍵を返却することで退避確認 2 が確立する。退避確認1および退避確認 2 が確立し、さらに、Figure 7 に示す加速器運転制御ユニットの加速器停止/運転スイッチを運転側に切り替えることにより、加速器運転許可が確立し、ビームストップ、LEBT ビームラインゲートバルブを開くことが可能となる。

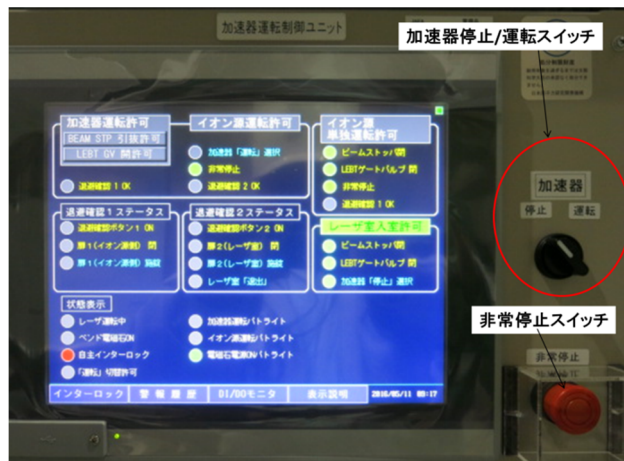


Figure 7: Control unit for PPS.

3 MeV リニアックの安定運転には、イオン源を長時間運転させ、プラズマを安定させる必要がある。その為、イオン源の単独運転が要求されている。イオン源を運転する場合、扉 1 エリア内に設置された高電圧電源が動作する。PPS では、イオン源運転時の人への被害を防止する為、イオン源運転許可を設けた。イオン源運転許可を確立するには、RFQ への誤入射を防ぐ為、ビームストップ、LEBT ゲートバルブが挿入されている必要がある。かつ、扉 1 エリアの退避確認、及び扉 1 の施錠が完了していればイオン源運転許可を確立できる。これにより、MEBT ライン及びレーザのメンテナンス中でも、イオン源の運転状態を維持することができる。その為、メンテナンス終了後、直ぐに安定したビームを供給することが可能となり、3 MeV リニアックの運転を効率的に進めることに寄与する。

加速器運転許可、イオン源運転許可、レーザ運転状態を現場作業員、運転員に周知する為に Figure 8 の運転表示灯、パトライトが扉 1、扉 2 周辺に設置されている。



Figure 8: Operation indicator light.

また、イオン源、クライストロン、高出力レーザの運転中に火災や人身事故等の重大事故が発生した時には Figure 1 に示す非常停止スイッチを押す。非常停止スイッチが押されると、加速器運転許可、イオン源運転許可を無効にし、イオン源電源の全ブレーカ断、クライストロン電源、レーザの発信を強制停止する。非常停止スイッチは Figure 1 に示すとおり、放射線発生装置使用室内外に 4 箇所設置されている。また、加速器運転制御ユニット盤面にも非常停止スイッチが設置されている。

5. まとめ

3 MeV リニアックの運用に伴い、EPICS を用いた遠隔制御システム、タイミングシステム、MPS、及び PPS を効率的に設計、開発し、ビーム加速、イオン源の単独運転、及びレーザの調整運転が安全に実現することを確認した。今回、開発した 3 MeV リニアック用制御システムは、3 MeV リニアックの安全な運転、及び研究成果に大きく貢献するものである。

参考文献

- [1] K. Hirano *et al.*, “J-PARC 3 MeV リニアックを用いたビームスクレーパの開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016.
- [2] H. Takei *et al.*, “J-PARC 3 MeV リニアックにおけるレーザ荷電変換試験の結果(速報)”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016.
- [3] S. Fukuta *et al.*, “J-PARC RF イオン源&RFQ III テストスタンドの制御系の構築”, Proceedings of the 10th Annual

Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.

- [4] F. Tamura *et al.*, “J-PARC Timing System”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004.
- [5] Hironao Sakaki *et al.*, “Interlock Systems for J-PARC LINAC”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai Japan, Aug 2-4, 2006.
- [6] Takahiro Suzuki *et al.*, “Development of J-PARC LINAC/RCS MPS Sub System”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima Japan, Aug 6-8, 2008.